第46卷　第2期
2023年2月
干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY
Vol. 46 No. 2
Feb. 2023

2000—2020年蒙古高原湖泊变化及其影响因素分析

高彦哲，　阿拉腾图娅，　旲　娜，　敖日格乐
（内蒙古师范大学地理科学学院，内蒙古 呼和浩特　010022）

摘　要：基于Landsat遥感影像，提取蒙古高原2000—2020年每年1 km^2以上湖泊面积信息，分析其时空变化特征。结果表明：(1) 2009年之前湖泊面积和数量呈减少趋势，2009年之后呈增加趋势，整体上2000—2020年湖泊面积和数量呈减少趋势。(2) 不同等级湖泊变化差异较大，特大型和中型湖泊变化相对稳定，大型湖泊减少幅度最大。(3) 不同区域湖泊变化也不同，西北部湖泊变化较稳定，中东部湖泊变化较剧烈。(4) 研究区湖泊空间分布集聚性呈异因同向的减弱趋势。(5) 湖泊面积与年均气温、年降水量、年蒸发量、植被指数和4层土壤水分的相关关系较为显著，且2个时间段内表现的影响程度有明显差异。掌握蒙古高原湖泊时空变化情况及其原因，对蒙古高原乃至全球的气候调节和生物多样性保护研究提供可参考依据。

关 键 词：湖泊；时空变化；影响因素；蒙古高原
文章编号：1000-6060(2023)02-0191-10(0191~0200)

湖泊作为重要的水资源，具有多种功能，能调节气候、防洪灌溉、提供工业和饮用水源，还能繁衍水生动物、植物，发展水产，改善湖区生态环境，提高环境质量，为人们提供旅游度假场所，在生态、经济发展中发挥着重要作用[1]。蒙古高原地域广阔、地形地貌复杂、植被类型多样、自然条件严酷，是对全球变化响应的敏感带[2]。目前已知的全球9条候鸟迁徙路线中3条路线经过蒙古高原。蒙古高原湖泊数量众多，且多为小型湖泊，湖盆较浅，季节性波动明显，在气候变化和人类活动的影响下，高原湖泊在过去几十年内面积及数量大大缩减[3-5]。湖泊面积萎缩，水位下降，沙尘暴频率增加，湖区生态环境质量恶化，影响鸟类繁殖栖息，繁殖数量下降[6-8]。有关蒙古高原湖泊变化的国内外研究成果较少，且多集中分析典型、大型湖泊变化[9-10]，成因上重点考虑对气象要素和人为要素的研究[11-12]，而小型湖泊以及针对湖泊面积与土壤环境要素关系的研究相对薄弱。

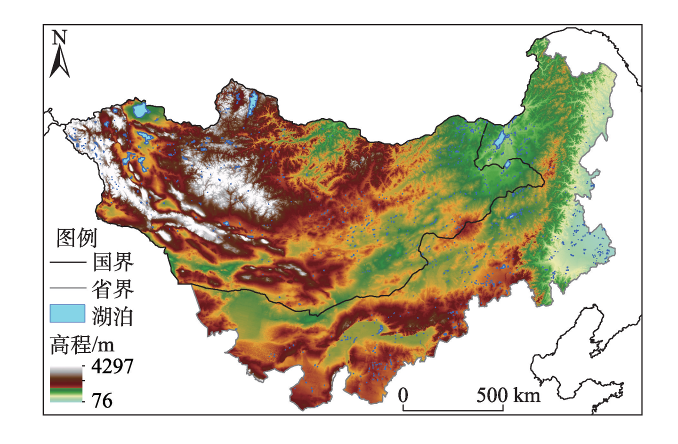
鉴于此，监测蒙古高原湖泊变化时空分布特征，结合多角度自然要素数据，揭示湖泊变化影响因素，对蒙古高原，乃至全球气候变化研究、保护候鸟栖息和繁衍场所、水环境及动植物研究具有十分重要的现实意义。

1　研究区概况

蒙古高原位于亚洲东北部地区，东起大兴安岭，西至阿尔泰山脉，北界为萨彦岭、肯特山和雅布洛诺夫山脉，狭义南抵阴山山脉[13]，广义南沿长城[14]，包括蒙古国全部、俄罗斯南部和中国北部地区。研究区选取蒙古国和中国内蒙古地区的蒙古高原主体部分(图1)，地理位置介于37.25°~53.10°N，87.50°~126.07°E之间，地势起伏较大，自西向东逐渐降低。地形地貌复杂多样，有高山、中山、低山、丘陵、高原、平原。其西北部为湿润半湿润区，地形较多为高山和中山，植被类型多为山地针叶林、典型草原和草甸草原；西南部为干旱区，地形主要为丘陵和

收稿日期：2022-08-29；　**修订日期**：2022-09-15
基金项目：内蒙古自然基金(2019MS04011)资助
作者简介：高彦哲(1998-)，女，硕士研究生，主要从事资源与环境遥感等方面的研究. E-mail: gyznmgggg@163.com
通讯作者：阿拉腾图娅(1969-)，女，教授，主要从事资源与环境遥感等方面的研究. E-mail: altty@imnu.edu.cn

平原,植被类型多为戈壁荒漠和荒漠草原;中东部主要为半干旱区,平原、丘陵和台地等地形较多,植被类型主要为典型草原;东部在气候分区上为湿润半湿润区,地形主要有中山和丘陵,植被类型多样,有阔叶林、针叶林、草甸草原、灌丛和农田;南部为半干旱区,地形主要为丘陵、平原和沙地,植被类型多为沙地植被、灌丛和农田。



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4634号的标准地图制作,底图边界无修改。

图1 研究区及湖泊分布示意图

Fig. 1 Study area and distribution of lakes

2 数据与方法

2.1 数据来源

以美国地质调查局(USGS)的Landsat TM、ETM+、OLI系列卫星影像为数据源,选取了2000—2020年每年8—10月丰水期的共21期3591景影像,云量小于10%,个别影像信息缺失时,由7月或11月的影像代替。数字高程数据(DEM)来源于美国航空航天局和国防部国家测绘局联合测量的SRTM数据。植被指数、白天地表温度数据分别从MODIS遥感影像中MOD13A2、MOD11A2获取。4层土壤水分、气温、降水量和蒸发量数据来源于ERA5-Land再分析数据集[15],取自哥白尼气候数据库,空间分辨率为0.1°×0.1°。4层土壤水分数据分别是第一层(0~7 cm)、第二层(7~28 cm)、第三层(28~100 cm)和第四层(100~289 cm)4个不同深度的墒情数据。

2.2 研究方法

利用Landsat绿波段和中红外波段,通过改进的归一化差异水体指数(Modified normalized difference water index,MNDWI)[16]提取了湖泊水面信息,该方法可以较好地区分阴影与水体,以及盐碱地和水体[17],计算公式为:

$$\mathrm{MNDWI}=\frac{\rho_{\mathrm{Green}}-\rho_{\mathrm{MIR}}}{\rho_{\mathrm{Green}}+\rho_{\mathrm{MIR}}} \tag{1}$$

式中:ρ_{Green}为Landsat TM、ETM+和OLI传感器的绿波段(0.52~0.60 μm);ρ_{MIR}为中红外波段(1.55~1.75 μm)。结合人工目视解译,获取蒙古高原2000—2020年1 km^{2}以上的湖泊面积信息,并从提取的结果中抽取500个样本,利用Google earth高分辨率数据进行验证,并将5 km^{2}以上的湖泊与水文地图对比,准确率分别为98.20%和84.03%。

将湖泊作为点要素,采用最邻近指数法揭示蒙古高原湖泊在地理空间中相互邻近的程度及其变化。当最邻近指数>1时,表明湖泊分布类型为离散分布;当最邻近指数<1时,表明湖泊分布类型为集聚分布。

3 结果与分析

3.1 湖泊时间变化

提取2000—2020年逐年的1 km^{2}以上湖泊信息,分析年际变化趋势结果发现,蒙古高原湖泊面积和数量年际变化很大,在2000—2009年呈减少趋势,2009—2020年有所恢复(图2)。湖泊水面面积在2003、2008、2012、2016年和2018年出现了相对高值,2002、2006、2009、2015年和2017年出现了相对于邻近2 a萎缩的低值。2000年湖泊面积最大为19345.19 km^2,2009年湖泊面积达到最低值为17176.82 km^2。研究期内湖泊面积减少了1443.91 km^2,变化率为7.46%;从数量看,2018年湖泊数量最多,为877个,2009年湖泊最少,为578个,研究期内湖泊数量共减少了92个,变化率为11.17%,其变化曲线波动较大。

为确定不同规模湖泊的变化趋势,根据湖泊面积大小,将湖泊划分4个等级:1~10 km^{2}为小型湖泊;10~100 km^{2}为中型湖泊;100~1000 km^{2}为大型湖泊;>1000 km^{2}为特大型湖泊。统计不同等级的湖泊面积和数量变化情况结果发现,各等级湖泊总面积排序与等级大小排序一致,即特大型湖泊>大型湖泊>中型湖泊>小型湖泊,总数量排序却与之相反(表1)。

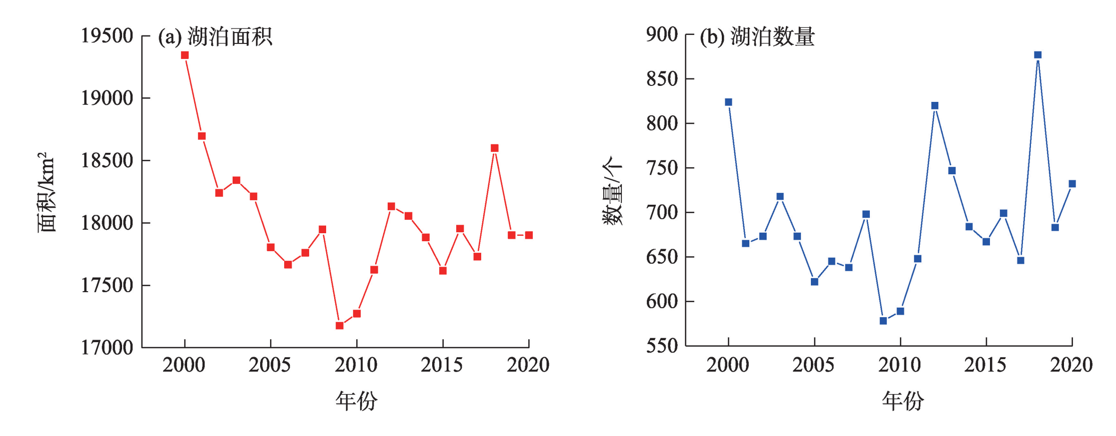


图2　2000—2020年蒙古高原湖泊面积和数量年际变化

Fig. 2　Annual changes of lake area and quantity in Mongolian Plateau from 2000 to 2020

表1　各等级湖泊面积和数量变化情况

Tab. 1　Changes of lake area and quantity at different levels

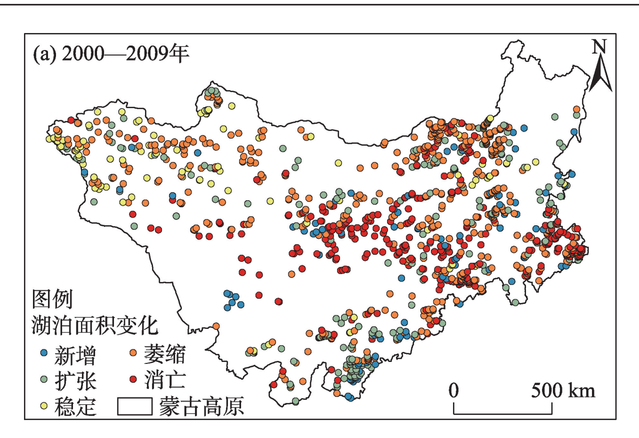
湖泊等级	2000年		2020年		占总湖泊面积变化的比例/%	占总湖泊数量变化的比例/%
	面积/km²	数量/个	面积/km²	数量/个		
小型湖泊	1983.24	727	1709.48	645	18.96	89.13
中型湖泊	2103.51	79	2057.29	72	3.20	7.61
大型湖泊	3938.26	13	3192.61	10	51.64	3.26
特大型湖泊	11320.19	5	10941.91	5	26.20	0.00

2000—2020年特大型湖泊数量不变，而面积减少了378.28 km²，变化率为3.34%，占总湖泊面积减少量的比例为26.20%；大型湖泊面积减少幅度最大，达745.65 km²，变化率为18.93%，占总湖泊面积减少量的比例为51.64%。湖泊数量变化不大，只减少了3个，变化率为23.08%；中型湖泊面积减少46.22 km²，变化率为2.20%，占总湖泊面积减少量的比例为3.20%。湖泊数量减少了7个，变化率为8.86%；小型湖泊面积减少了273.76 km²，变化率为13.80%，占总湖泊面积减少量的比例不大，只占18.96%，但其湖泊数量减少最多，共82个，变化率为11.28%，占湖泊减少总数的比例最大，达89.13%。整体上，除特大型湖泊数量不变，特大型湖泊面积及其他等级的湖泊面积和数量均有所减少，其中面积变化方面大型、特大型湖泊的贡献较大，数量方面小型、中型湖泊的贡献较大。

3.2　湖泊空间变化

为分析蒙古高原湖泊面积变化的空间分异特征，获取每年1 km²以上的湖泊在其他年份的面积情况，并将湖泊面积变化分为5种类型：研究初期存在而研究末期干涸的为消亡，面积变化率<−2%的为萎缩，在−2%~2%之间的为稳定，>2%的为扩张，研究初期没有而研究末期存在的为新增。从图2已发现湖泊变化具有阶段性，因此以2009年为分界点，分析2000—2009年和2009—2020年2个不同时期湖泊变化类型及其空间分布特征。

从结果(图3)看，整体上蒙古高原中东部、西北部和南部湖泊分布较为密集。2000—2009年萎缩湖泊为467个，占其总湖泊数量的41.47%，主要分布中东部、西北部和南部湖泊集中分布区；其次为消亡的湖泊数量为285个，占湖泊总数的25.31%，主要分布在中东部地区；扩张的湖泊有177个，占湖泊总数的15.72%，零散分布在各个区域，较为集中的是南部地区；新增的湖泊为99个，占湖泊总数的8.79%，除西南部地区，其他与扩张湖泊的分布区域基本一致；稳定的湖泊为98个，占湖泊总数的8.70%，主要分布在西北部地区。2009—2020年与前10 a相同的一点是湖泊变化各类型中萎缩湖泊的数量也是最多，达354个，占总湖泊数量的31.22%，主要分布中东部、西北部和南部地区；与前10 a不同的是数量排位第2的类型为扩张的湖泊，数量达339个，占湖泊总数的29.89%，主要分布在中东部地区；



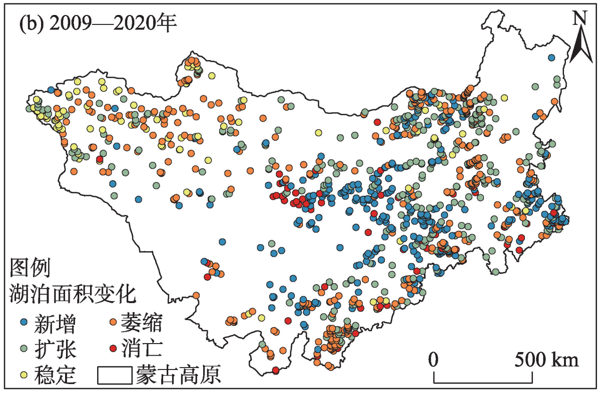


图3 蒙古高原2个时间段内湖泊面积空间变化特征

Fig. 3 Spatial variation characteristics of lake area in Mongolian Plateau in two periods

新增的湖泊为293个，占湖泊总数的25.84%，同样主要分布在中东部地区；稳定的湖泊为85个，占湖泊总数的7.50%，主要分布在西北部地区；消亡的湖泊数量为63个，占湖泊总数的5.56%，在中部和东南部地区零散分布。

总体上，整个研究期多数湖泊面积萎缩，前期消亡湖泊较多，后期新增和扩张的湖泊较多；萎缩湖泊分布较为离散，前期消亡湖泊与后期新增湖泊分布较为一致，多集中在中东部地区；2个时期面积稳定的湖泊集中在西北部地区。

湖泊数量的变化会引起湖泊空间分布形态变化，从而导致水资源的空间分配、候鸟迁徙安全路径的变动。为此引入最邻近指数方法，研究了蒙古高原湖泊空间分布变化情况。该方法不仅可以从宏观上了解湖泊的空间分布格局，并且可以测定湖泊变化引起的空间分布变化强度，有利于判断湖泊何种变化类型使得湖泊分布更加聚集或离散。根据湖泊变化趋势计算2000、2009年和2020年蒙古高原1 km^{2}以上湖泊的最邻近指数(表2)结果发现，3个时间点的最邻近指数均小于1，表明蒙古高原湖泊分布为聚集型，且均为显著聚集型。研究期内蒙古高原湖泊最邻近指数持续增加，预期平均距离先增加后减少，揭示了2000—2009年蒙古高原主要由于中东部密集区湖泊数量减少的同时西南部稀疏区新增湖泊，导致其空间分布集聚性减弱，2009—2020年中东部湖泊数量增加的同时中部稀疏区又新增湖泊，导致整体分布较为离散，空间分布集聚性减弱，产生异因却同向的趋势。

3.3 湖泊变化影响因素

湖泊面积变化受各种环境要素影响，故从大气环境、地表环境和土壤环境3个层面，获取研究期的年均气温、年降水量、年蒸发量、植被指数、地表温度和4层土壤水分变化情况，并依据研究期内蒙古高原湖泊面积变化特征，以2009年为界揭示各要素对2个阶段湖泊面积变化的影响及其差异。

表2 蒙古高原湖泊空间集聚情况

Tab. 2 Spatial agglomeration of lakes in Mongolian Plateau

年份	最邻近指数	Z得分	预期平均距离	空间分布类型
2000	0.66	−18.79	28631.42	显著聚集型
2009	0.70	−13.82	34185.55	显著聚集型
2020	0.73	−14.10	30377.43	显著聚集型

注：Z为统计显著性的量度，当$Z<-2.58$时，表示在0.01水平上湖泊显著聚集。

3.3.1 各环境因素 蒙古高原多年平均气温为3.02 ℃，2007年为最大值，2012年为最小值，2007—2012年年均气温波动幅度较大，整体上呈波动上升趋势(图4a)；年降水量在研究期内呈波动略微增加的趋势，2003年为最大值，2017年为最小值(图4b)，在2003、2008、2012、2016年和2018年表现为较高的水平，与湖泊面积变化曲线的波峰相吻合；年蒸发量整体呈波动略微下降趋势，2003年为最大值，2009年为最小值(图4c)。在2003、2012、2016年和2018年表现为较高的蒸发量，同年湖泊面积较大，2006、2009年和2017年表现为较低的蒸发量，在这些年份湖泊面积较小；植被指数整体呈显著增加趋势(图4d)，2000—2009年植被指数波动较小，2009—2020年波动较大，年际变化幅度逐渐加大；研究期内地表温度呈波动略微减少趋势，2000年达到最高值，2012年达到最低值(图4e)，在2003、2012、2016

年和2018年为波谷，同年湖泊面积处于波峰；研究期内土壤不同深度的墒情变化趋势不尽相同。其中，第一、二和三层土壤水分在2000—2007年呈减少趋势，仅在2003年或2004年有所增加，2007—2020年呈增加趋势（图4f~h），尤其是第二层土壤水分增加趋势更为明显；第四层土壤水分整体呈显著减少趋势（图4i）。4层土壤水分多年平均值分别为0.18 $m^3 \cdot m^{-3}$、0.20 $m^3 \cdot m^{-3}$、0.19 $m^3 \cdot m^{-3}$和0.19 $m^3 \cdot m^{-3}$，第二层土壤水分的均值最高。整体上年均气温和植被指数的增加趋势，第四层土壤水分的减少趋势较明显，其余环境因素波动幅度较大。

3.3.2 湖泊面积变化影响因素 将各环境因素分别与2个时间段的湖泊面积拟合，结果发现，2000—2009年湖泊面积减少与年均气温增加、年蒸发量和4层土壤水分减少密切相关，相关系数分别为-0.46、0.61、0.61、0.78、0.80和0.91，而与年降水量、植被指数和地表温度的相关性较弱（图5）。其中，土壤水分随其埋藏越深，对湖泊面积减少的影响越大；2009—2020年湖泊面积与年降水量、年蒸发量、植被指数和第一、二、三层土壤水分呈显著正相关关系，相关系数分别为0.72、0.82、0.67、0.66、0.84和0.69；与年均气温、地表温度和第四层土壤水分的相关性较弱（图6）。在以2009年为分界点的2个时间段内湖泊面积变化与年蒸发量和第一、二、三层土壤水分均表现为较显著的正相关关系，其中除第三层土壤水分，其余与湖泊面积增加的正相关关系更强；而整体上湖泊面积变化与地表温度的相关关系表现较弱；年均气温升高和第四层土壤水分减少对湖泊面积萎缩的影响较大；植被指数和年降水量增加与湖泊面积扩张的关系较显著。

4 讨 论

目前，众多学者针对典型湖泊或小区域内湖泊面积变化进行研究的成果较多[18-21]。虽有部分以中

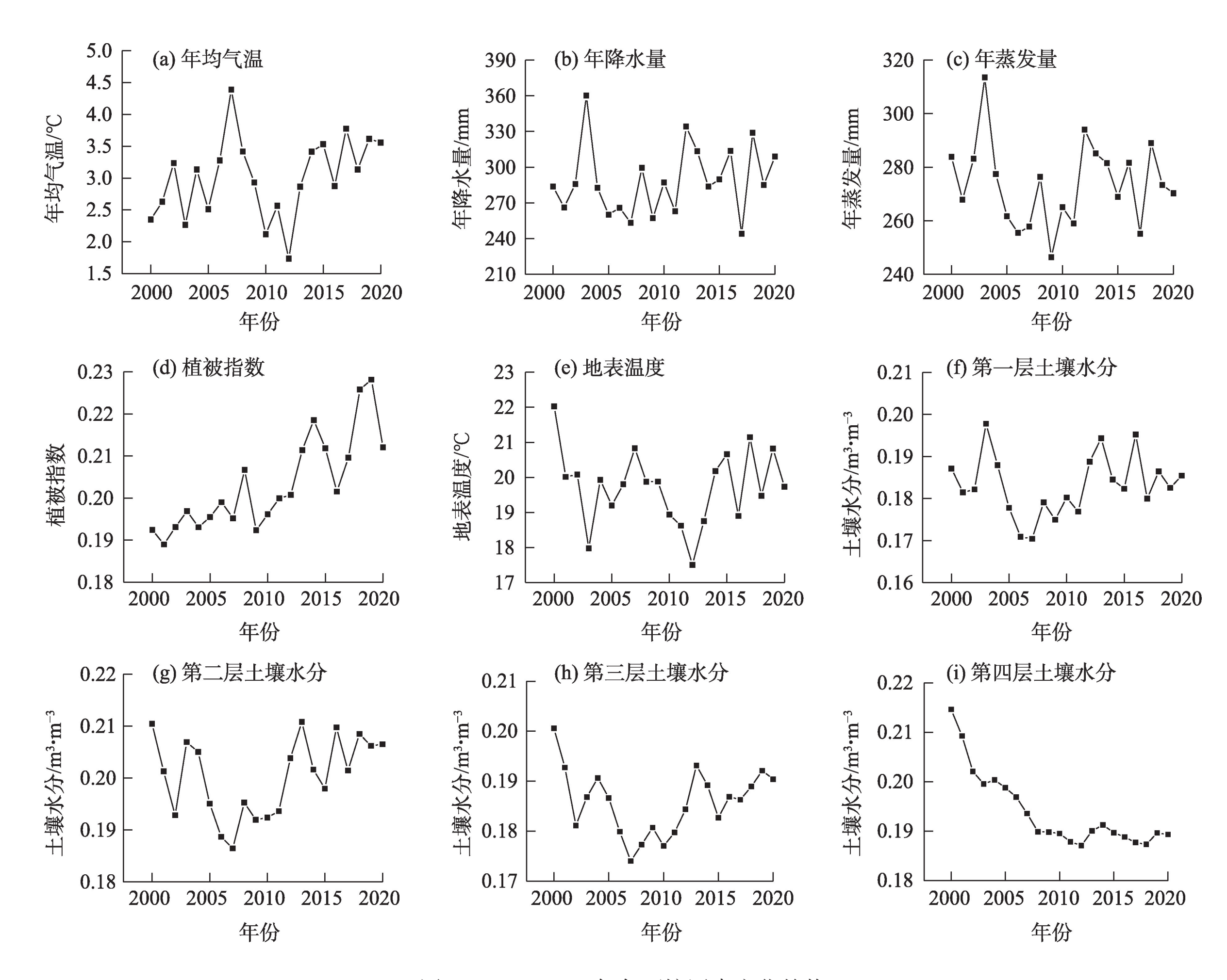


图4 2000—2020年各环境因素变化趋势

Fig. 4 Trends of environmental factors from 2000 to 2020

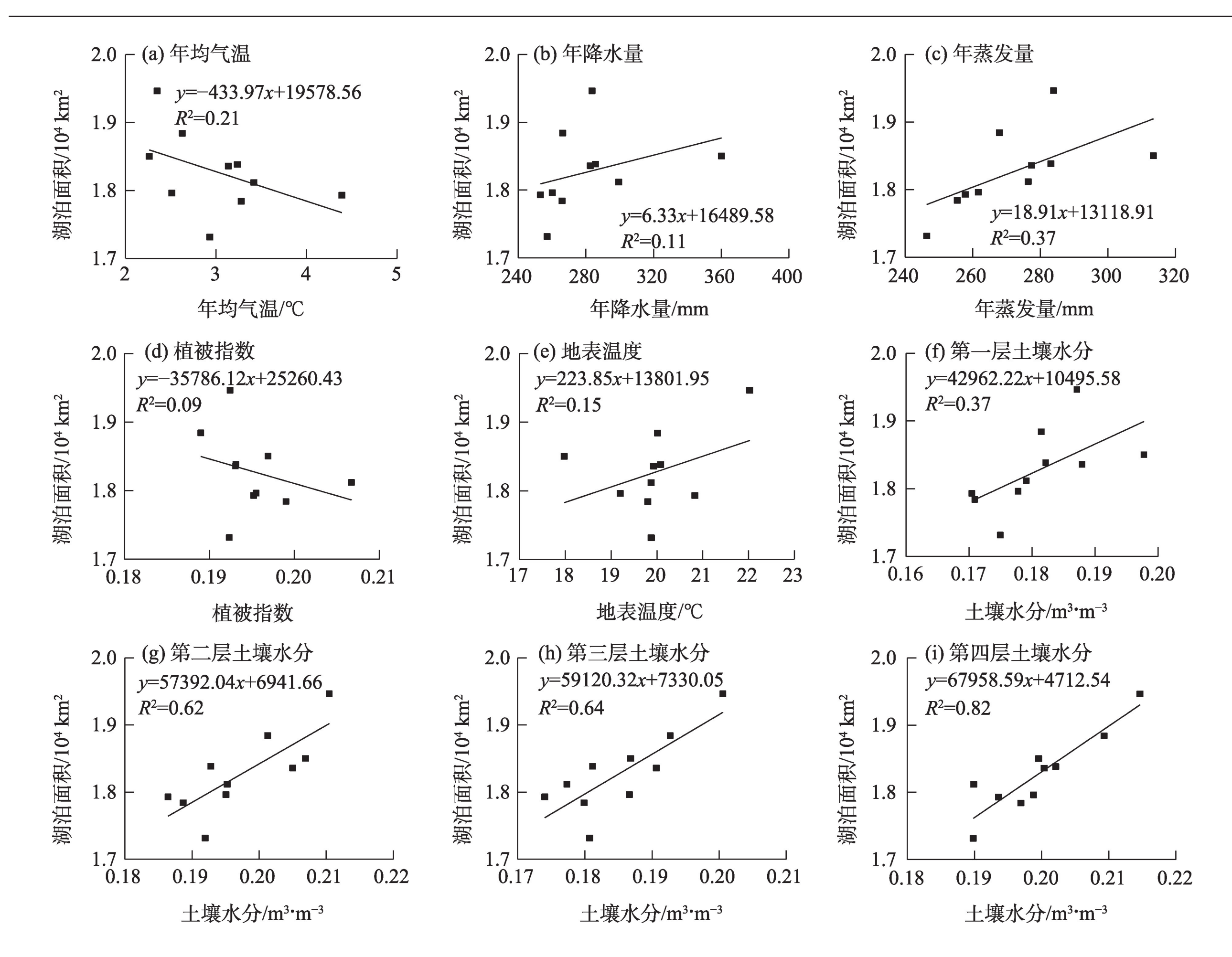


图5 2000—2009年湖泊面积与各环境因素的关系

Fig. 5 Relationship between lake area and environmental factors from 2000 to 2009

亚和青藏高原等大区域为研究区[22-24]，分析众多湖泊的变化特征，但多数未将空间大尺度、小型湖泊和时间连续等特点结合进行分析，尤其是蒙古高原的相关研究更少。为此，监测蒙古高原湖泊面积和数量变化趋势，揭示湖泊空间分布的变化规律，对水源地变迁、候鸟等生物多样性保护、全球气候暖干化的警示具有十分重要的实际意义。

已有关于湖泊面积的影响因素研究多集中于气温、降水量、蒸发量和植被等自然因素的影响[25-27]，采用其他自然要素研究的文献较少。而湖泊水量变化不仅受到大气环境和地表环境的影响，还会受到地下水文环境的影响，并且浅小湖泊对周围环境变化更敏感。因此，以能够较准确监测到的众多湖泊作为大量样本，分析湖泊面积变化情况，并揭示湖泊面积变化与气温、降水量、蒸发量、植被指数、地表温度和土壤水分等自然因素的关系，有助于更深入了解影响湖泊水量收入与支出以及水量平衡的主要要素，从而为探讨不同地区及不同类型湖泊动态变化的主要影响因素及其差异，对湖泊水源保护具有理论指导意义。

区域尺度的湖泊研究对了解不同区域对气候变化的响应十分重要[28]。蒙古高原和青藏高原均为气候变化的敏感区域，但2个高原的湖泊面积变化情况明显不一致。近几十年来青藏高原湖泊面积整体呈增加趋势[29-31]，而本研究结果表明蒙古高原的湖泊面积虽2009年后有所增加，总体上还是呈减少趋势。造成这种差异的根本要素相同，均为降水量和气温变化，但其影响机制不同，结果也不同。由此可见，从研究区的地理环境特征出发寻求原因很有必要，这对提升湖泊变化过程与机制的认识，深入研究区域环境变化和小流域治理等具有一定的理论和实践意义。本研究中，虽对影响整个蒙古高原湖泊面积的大气、地表、土壤环境要素进行了相关分析，梳理出不同时间段内普遍影响的主要要

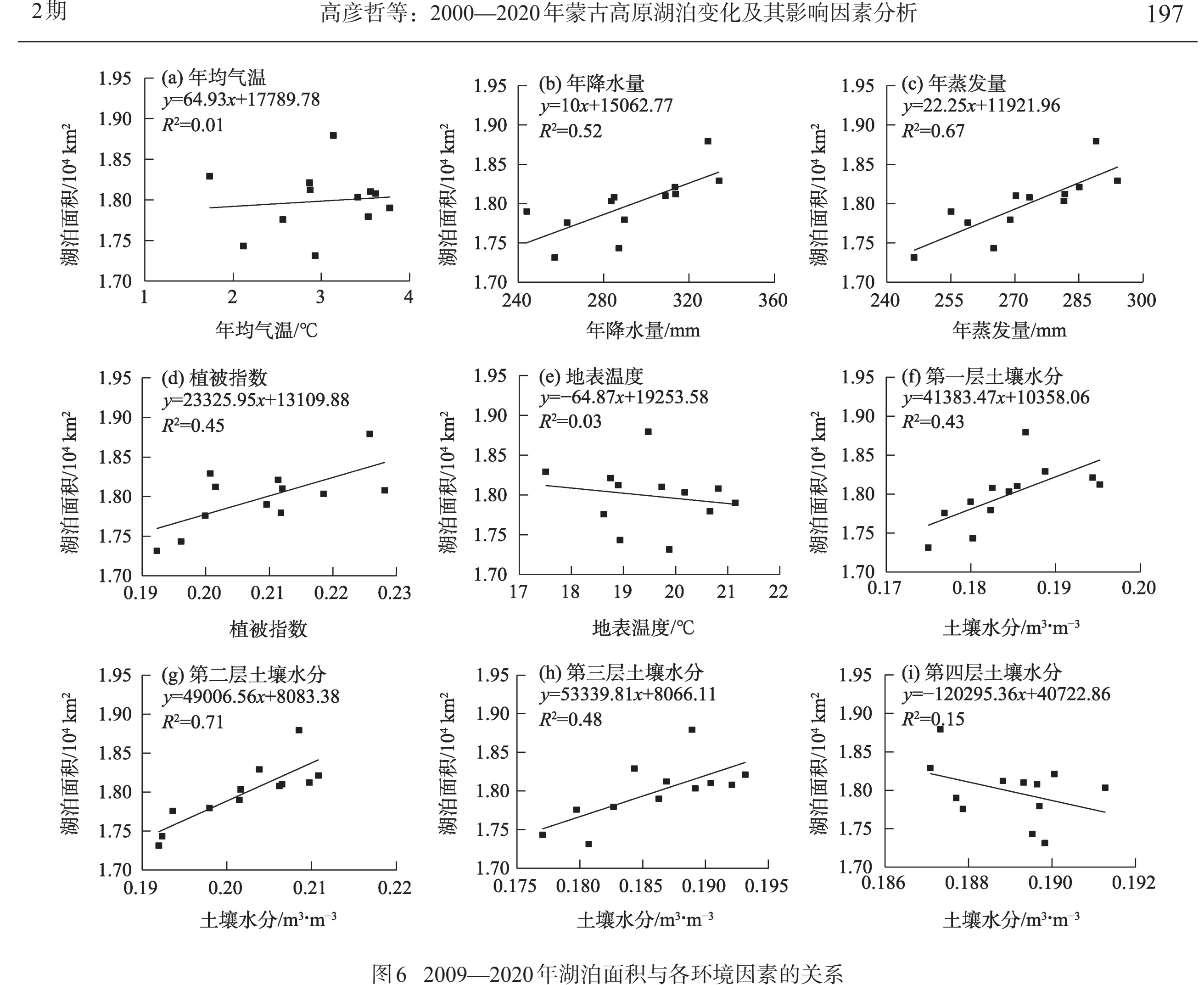


图6 2009—2020年湖泊面积与各环境因素的关系

Fig. 6 Relationship between lake area and environmental factors from 2009 to 2020

素，而在影响机制方面没有深入分析。如从理论角度讲，植被覆盖度上升，会提高降雨下渗比例，补给地下水，再通过地下径流补给湖泊水。但研究结果发现，2000—2009年蒙古高原植被覆盖度呈增加趋势的情况下湖泊面积反而萎缩，这可能是植被的水源涵养功能没有能够有效发挥作用。土壤水分与湖泊面积相关性较强，反映了蒙古高原的湖泊水除了降水直接补给外，还有很大比重是地下水补给。这些都表明具体要素之间相互作用的机制需进一步挖掘。

5 结 论

（1）研究期内蒙古高原湖泊面积和数量波动幅度较大，整体上有所减少，同时也表现出阶段性变化，2000—2009年呈减少趋势，2009—2020年呈增加趋势；小型湖泊数量最多，特大型湖泊面积最大，除特大型湖泊数量不变，其面积及其余湖泊面积和数量均有所减少，大型湖泊变化率最大。

（2）蒙古高原中东部、西北部和南部湖泊分布较多，且不同阶段不同变化类型的湖泊数量及分布差异较大。除2个时间段内萎缩湖泊均最多，且均分布在湖泊密集区；稳定湖泊均较多分布在西北部地区。2009年之前消亡湖泊较多，多集中在中东部湖泊密集区，导致湖泊空间分布集聚性减弱，2009年之后新增和扩张湖泊较多，同样多集中在中东部且在中部稀疏区更为分散，使湖泊分布集聚性继续减弱。

（3）近20 a来高原年均气温和植被指数显著增加，第四层土壤水分呈显著减少趋势，其余环境因素变化方向不一致，波动较大。这些环境要素中，2009年之前年均气温升高和4层土壤水分减少对湖泊面积减少的影响较大，之后植被指数、年降水量和第一、二、三层土壤水分增加与湖泊面积略微恢复的关系较为显著。

参考文献(References)

[1] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998. [Wang Sumin, Dou Hongshen. China lakes record[M]. Beijing: Science Press Ltd., 1998.]

[2] 李青丰, 李福生, 乌兰. 气候变化与内蒙古草地退化初探[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(4): 98-102. [Li Qingfeng, Li Fusheng, Wu Lan. A primary analysis on climatic change and grassland degradation in Inner Mongolia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(4): 98-102.]

[3] 汪敬忠, 吴敬禄, 曾海鳌, 等. 内蒙古主要湖泊水资源及其变化分析[J]. 干旱区研究, 2015, 32(1): 7-14. [Wang Jingzhong, Wu Jinglu, Zeng Hai'ao, et al. Changes of water resources of the main lakes in Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(1): 7-14.]

[4] 耿晓庆, 胡兆民, 赵霞, 等. 内蒙古呼伦贝尔草原湖泊变化研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(2): 400-408. [Geng Xiaoqing, Hu Zhaomin, Zhao Xia, et al. Three-decadal changes of lakes in Hulun Buir grasslands, Inner Mongolia[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(2): 400-408.]

[5] Zhang G Q, Yao T D, Chen W F, et al. Regional differences of lake evolution across China during 1960s—2015 and its natural and anthropogenic causes[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 221: 386-404.

[6] Liu D P, Zhang G G, Jiang H X, et al. Seasonal dispersal and longitudinal migration in the Relict Gull Larus relictus across the Inner-Mongolian Plateau[J]. PEERJ, 2017, 5: e3380, doi: 10.7717/peerj.3380.

[7] Reid-Shaw I, Jargalsaihan A, Reid R S, et al. Social-ecological change on the Mongolian Steppe: Herder perceptions of causes, impacts, and adaptive strategies[J]. Human Ecology, 2021, 49: 631-648.

[8] 赵格日乐图, 灵燕, 高敏. 近年来乌梁素海疣鼻天鹅种群数量变化及原因分析[J]. 动物学杂志, 2019, 54(1): 8-14. [Zhao Gerelt, Ling Yan, Gao Min. Population variation and its causes of mute swan in the Wuliangsuhai Lake in recent years[J]. Chinese Journal of Zoology, 2019, 54(1): 8-14.]

[9] Orkhonselenge A, Komatsu G, Uuganzaya M. Climate-driven changes in lake areas for the last half century in the valley of lakes, Govi Region, southern Mongolia[J]. Natural Science, 2018, 10(7): 263-277.

[10] Sumiya E, Dorjsuren B, Yan D H, et al. Changes in water surface area of the lake in the steppe region of Mongolia: A case study of Ugii Nuur Lake, central Mongolia[J]. Water, 2020, 12(5): 1470, doi: 10.3390/w12051470.

[11] Tao S L, Fang J Y, Zhao X, et al. Rapid loss of lakes on the Mongolian Plateau[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(7): 2281-2286.

[12] Zhou Y, Dong J W, Xiao X M, et al. Continuous monitoring of lake dynamics on the Mongolian Plateau using all available Landsat imagery and Google Earth Engine[J]. Science of the Total Environment, 2019, 689: 366-380.

[13] 魏宝成, 玉山, 贾旭, 等. 基于AMSR-2蒙古高原土壤水分反演及对气象因子响应分析[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(6): 837-844. [Wei Baocheng, Yu Shan, Jia Xu, et al. Analysis of soil moisture retrieval and response to meteorological factors using AMSR-2[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(6): 837-844.]

[14] 宝音. 蒙古学百科全书(地理卷)[M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 2011. [Baoyin. Encyclopaedia of Mongolian studies: Geography volume[M]. Hohhot: Inner Mongolia People's Publishing House, 2011.]

[15] Muñoz-Sabater J, Dutra E, Agustí-Panareda A, et al. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(9): 4349-4383.

[16] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595. [Xu Hanqiu. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI)[J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(5): 589-595.]

[17] 张郝哲, 田明中, 郭婧, 等. 基于RS和GIS的内蒙古达里诺尔湖1999—2010年动态监测[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(10): 41-46. [Zhang Haozhe, Tian Mingzhong, Guo Jing, et al. The dynamic monitoring of Dalinur Lake in Inner Mongolia during 1999—2010 based on RS and GIS[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(10): 41-46.]

[18] 王宇, 李均力, 郭木加甫, 等. 1989—2014年赛里木湖水面面积的时序变化特征[J]. 干旱区地理, 2016, 39(4): 851-860. [Wang Yu, Li Junli, Guomujiafu, et al. Time-series analysis of Sayram Lake area changes during 1989—2014[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(4): 851-860.]

[19] 张振瑜, 王乃昂, 吴月, 等. 1973—2010年巴丹吉林沙漠腹地湖泊面积空间变化的遥感分析[J]. 湖泊科学, 2013, 25(4): 514-520. [Zhang Zhenyu, Wang Nai'ang, Wu Yue, et al. Remote sensing on spatial changes of lake area in Badain Jaran Desert hinterland during 1973—2010[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(4): 514-520.]

[20] 张宝林, 贾瑞晨, 张倩, 等. 基于遥感的达来诺尔湖泊水域面积变化研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(6): 196-199. [Zhang Baolin, Jia Ruichen, Zhang Qian, et al. The water body area changes of Dalainur Lake based on satellite images of remote sensing[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(6): 196-199.]

[21] 张玉杰, 王宁练, 杨雪雯, 等. 基于多源遥感数据的1970—2020年巴尔喀什湖动态监测[J]. 干旱区地理, 2022, 45(2): 499-511. [Zhang Yujie, Wang Ninglian, Yang Xuewen, et al. Dynamic monitoring of Balkhash Lake from 1970 to 2020 based on multi-source remote sensing data[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(2): 499-511.]

[22] 李靖, 李浩, 王树东, 等. 中亚五国主要湖泊水面变化特征及关键影响因素分析[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(3): 639−646. [Li Jing, Li Hao, Wang Shudong, et al. Changes of major lakes in Central Asia and analysis of key influencing factors[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(3): 639−646.]

[23] Kang S, Lee G, Togtokh C, et al. Characterizing regional precipitation-driven lake area change in Mongolia[J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(2): 146−158.

[24] 梁斌, 齐实, 李智勇, 等. 青藏高原湖泊面积动态变化及其对气候变化的响应[J]. 山地学报, 2018, 36(2): 206−216. [Liang Bin, Qi Shi, Li Zhiyong, et al. Dynamic change of lake area over the Tibetan Plateau and its response to climate change[J]. Mountain Research, 2018, 36(2): 206−216.]

[25] Xia H M, Zhao J Y, Qin Y C, et al. Changes in water surface area during 1989—2017 in the Huai River Basin using Landsat data and Google Earth Engine[J]. Remote Sensing, 2019, 11(15): 1824, doi: 10.3390/rs11151824.

[26] 姜丽光, 姚治君, 刘兆飞, 等. 1976—2012年可可西里乌兰乌拉湖面积和边界变化及其原因[J]. 湿地科学, 2014, 12(2): 155−162. [Jiang Liguang, Yao Zhijun, Liu Zhaofei, et al. Variations of lake area and boundary of Ulan Ul Lake in Hoh Xil Region during 1976—2012 and their reasons[J]. Wetland Science, 2014, 12(2): 155−162.]

[27] 杜玉娥, 刘宝康, 贺卫国, 等. 1976—2017年柴达木盆地湖泊面积变化及其成因分析[J]. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1275−1284. [Du Yu'e, Liu Baokang, He Weiguo, et al. Analysis on the variation and cause of the lake area in Qaidam Basin from 1976 to 2017 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(6): 1275−1284.]

[28] 张国庆. 青藏高原湖泊变化遥感监测及其对气候变化的响应研究进展[J]. 地理科学进展, 2018, 37(2): 214−223. [Zhang Guoqing. Changes in lakes on the Tibetan Plateau observed from satellite data and their responses to climate variations[J]. Progress in Geography, 2018, 37(2): 214−223.]

[29] Zhang J, Hu Q W, Li Y K, et al. Area, lake-level and volume variations of typical lakes on the Tibetan Plateau and their response to climate change, 1972—2019[J]. Geo-spatial Information Science, 2021, 24(3): 458−473.

[30] 杨珂含, 姚方方, 董迪, 等. 青藏高原湖泊面积动态监测[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(7): 972−982. [Yang Kehan, Yao Fangfang, Dong Di, et al. Spatiotemporal monitoring of lake area dynamics on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(7): 972−982.]

[31] 闾利, 张廷斌, 易桂花, 等. 2000年以来青藏高原湖泊面积变化与气候要素的响应关系[J]. 湖泊科学, 2019, 31(2): 573−589. [Lü Li, Zhang Tingbin, Yi Guihua, et al. Changes of lake areas and its response to the climatic factors in Tibetan Plateau since 2000[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(2): 573−589.]

Lake changes and their influence factors in the Mongolian Plateau from 2000 to 2020

GAO Yanzhe, Alatengtuya, TAN Na, Aorigele

(College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China)

Abstract: The Mongolian Plateau is a sensitive area for coping with global changes. It is also the only place for three of the nine routes of migratory birds. Lakes play the role of "indicator" and "life posthouse" in the plateau ecological environment. Relatively few research results have been presented on the changes of lakes in the Mongolian Plateau at home and abroad. Most of them focused on the analysis of typical and large lakes. Research on their causes has focused on meteorological and human factors, while that on small lakes and the relationship between the lake area and the soil environmental factors are relatively weak. Based on the Landsat remote sensing imagery, the information of the lake area above 1 km^2 per year on the Mongolian Plateau from 2000 to 2020 was extracted by the MNDWI water body index. The results of the temporal and spatial change characteristic analysis of the lake area showed that: (1) The area and the number of lakes have decreasing and increasing trends before and after 2009, respectively. Overall, the area and the number of lakes depicted a decreasing trend from 2000 to 2020. (2) The changes of lakes of different grades were quite different. The changes of the super large- and medium-sized lakes were relatively stable. Furthermore, the large-sized lakes showed the largest reduction. (3) The changes of the lakes in different regions also differed. These changes in the northwest were relatively stable, while those in the central and eastern regions were more dramatic. (4) Before 2009, the number of lakes in the dense areas in the central and eastern regions decreased, resulting in the weakening of the spatial distribution agglomeration of lakes in the study area. After 2009, the newly added lakes in the sparse area in the central region were scattered, weakening their spatial distribution agglomeration. (5) The correlation between the lake area and the annual average temperature, annual precipitation, annual evaporation, vegetation index, and four layers of soil moisture was relatively significant. The degree of influence exhibited in the two time periods significantly differed. Mastering the temporal and spatial changes of the lake in the Mongolian Plateau and their causes can provide a reference for the climate regulation, biodiversity protection, and climate disaster reduction research in the Mongolian Plateau and the whole world.

Key words: lakes; temporal and spatial changes; influencing factors; Mongolian Plateau